



# 电路与模拟电子技术

## 模电期末复习

浙江大学电工电子教学中心

蔡忠法



## 课程内容：

- 电子器件与放大基础知识
- 多级放大电路与差分放大电路
- 负反馈与运算电路
- 波特图与稳定性
- 功率放大与稳压电源电路
- 波形发生电路

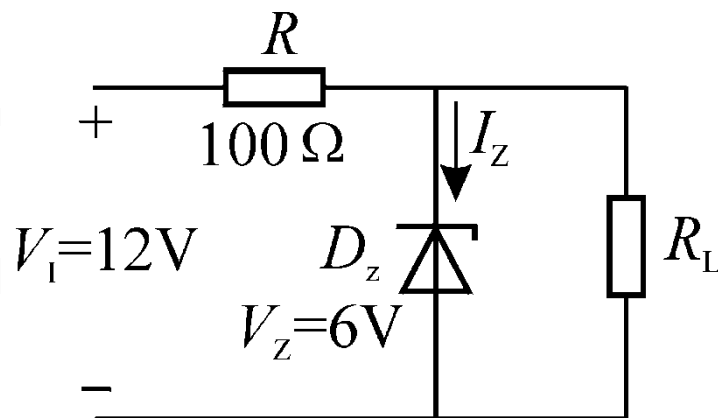
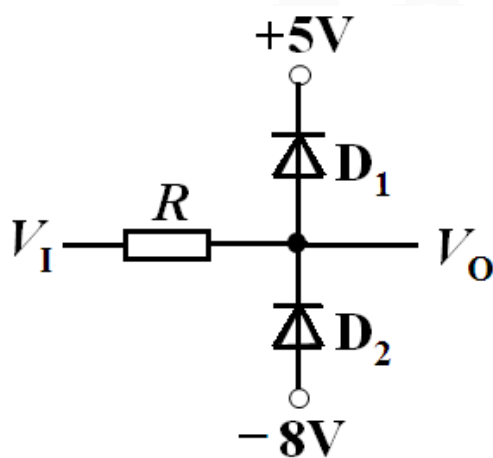


## ➤ 电子器件与放大基础知识

- ✧ 二极管的特性和稳压管的应用电路
- ✧ 三极管类型和工作区的判别
- ✧ 场效应管的类型和主要参数
- ✧ 放大电路的性能指标及图解分析法
- ✧ 放大电路的偏置电路型式、耦合方式
- ✧ 负载线，截止失真与饱和失真，交越失真
- ✧ 三组态放大电路的特点
- ✧ 集成运放的组成和特性

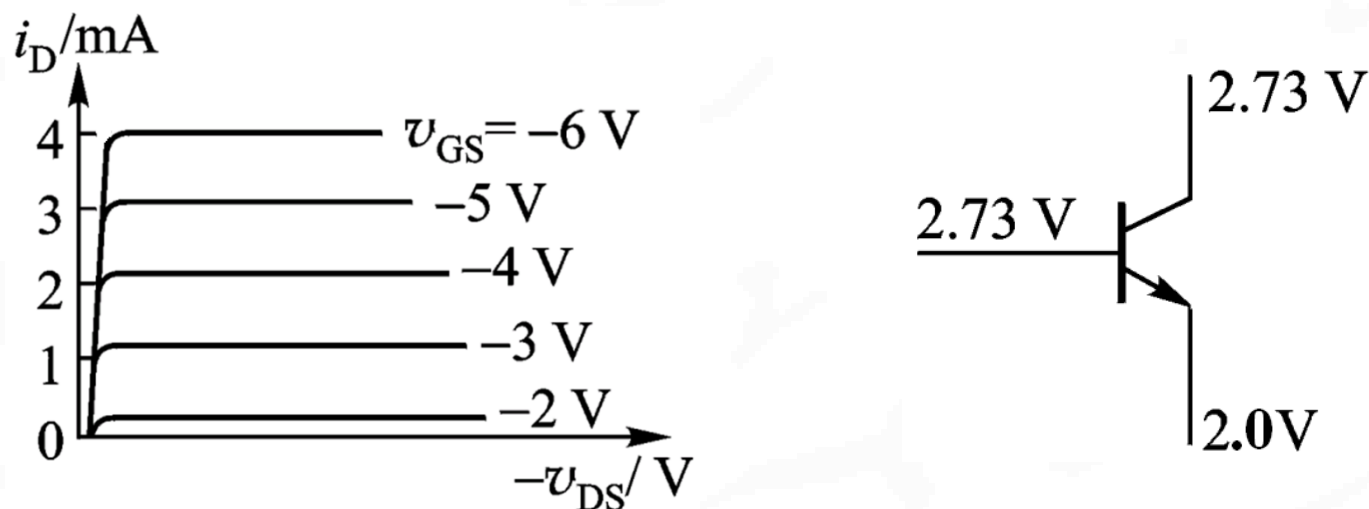
## 【例1】器件与放大基础

✧ 图示电路中，二极管导通电压为 $0.7\text{V}$ ，当输入 $V_I = -10\text{V}$ 时，二极管 $D_1$  截止， $D_2$  导通（导通，截止），输出 $V_O =$   $-8.7$   $\text{V}$ 。



✧ 在图示稳压电路中，已知稳压管的最大允许电流为 $40\text{mA}$ ，最小稳压电流为 $5\text{mA}$ 。则在稳压条件下，负载 $R_L$ 上的电流不应超过  $55$   $\text{mA}$ 。

- ✧ 场效应管的输出特性曲线如下图所示，该管是 增强型PMOS，开启电压  $V_T$  约为 -2 V。



- ✧ P沟道结型场效应管工作在线性放大区时， $V_{GS}$  为 正 电压， $V_{DS}$  为 负 电压。
- ✧ 在某电路中测得三极管三个极对地电压如图所示，该三极管为 NPN硅 管（NPN/PNP；硅/锗），工作在 临界饱和 状态。

✧ 通用型集成运放的输入级采用差分放大电路，主要是因为它的 [ C ]

A. 输入电阻高

B. 输出电阻低

C. 共模抑制比大

D. 电压放大倍数大

✧ 判断正确或错误：

[ × ] 三种基本组态放大电路的输入电阻均与负载电阻无关。

[ ✓ ] 一个理想的集成运算放大器只能放大差模信号，不能放大共模信号。

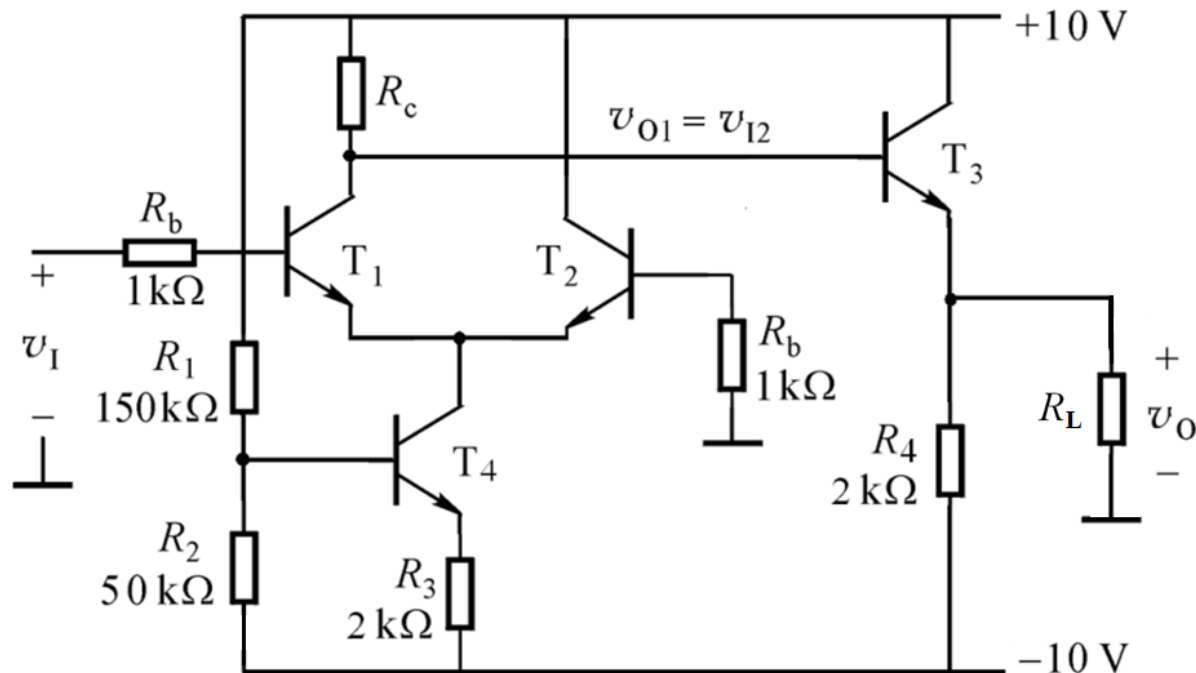
[ ✓ ] 实际运放在开环时，输出很难调整到零电位，只有在闭环时才能调至零电位。



## ➤ 多级放大电路与差分放大电路

- ✧ 会利用直流通路求出静态工作点
- ✧ 会画出微变等效电路计算性能指标 $A_v$ 、 $R_i$ 、 $R_o$
- ✧ 多级放大电路应采用“逐级计算”，并考虑“负载效应”
- ✧ 差分放大电路“差模与共模叠加”原理
- ✧ 差模交流通路与共模交流通路的特点，差分放大电路的4种输入输出方式及特点
- ✧ 掌握电流源在差分放大电路中的应用

## 【例2】多级放大电路



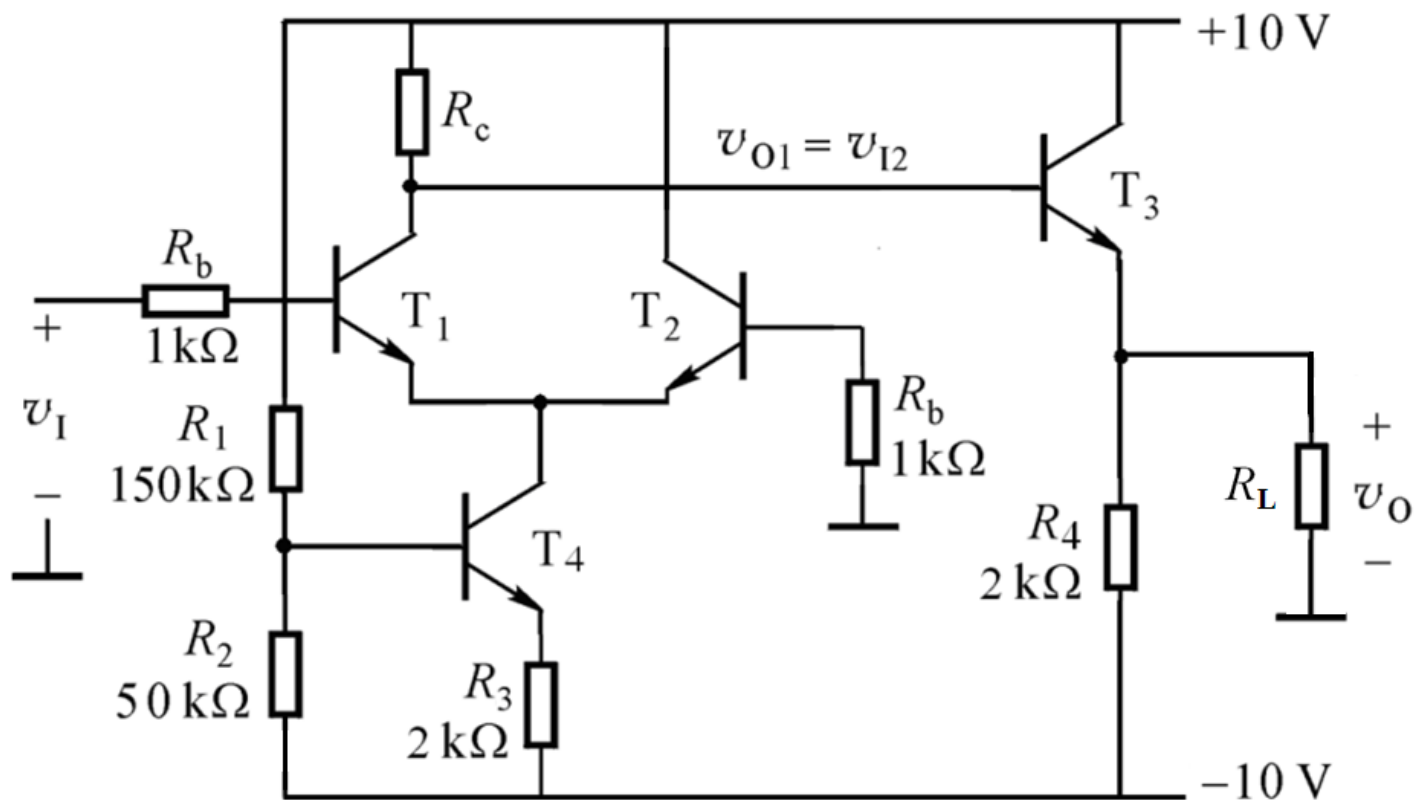
图示电路中，三极管的 $\beta$ 均为50， $V_{BE}=0.7V$ ， $r_{be}$ 均已知。

- (1) 电路中 $T_4$ 构成什么电路？起什么作用？
- (2) 当 $V_I=0$ 时，输出静态电压 $V_O=0$ ，求 $R_c$ 的值；
- (3) 写出电压增益  $A_{v1} = \Delta v_{O1} / \Delta v_I$  和  $A_{v2} = \Delta v_O / \Delta v_{I2}$  的表达式；
- (4) 写出输入电阻 $R_i$ 的表达式。



【解】

(1)  $T_4$  构成什么电路？起什么作用？



$T_4$  管构成电流源；作为差分放大电路的射极偏置。

(2) 求  $R_c$  的值:

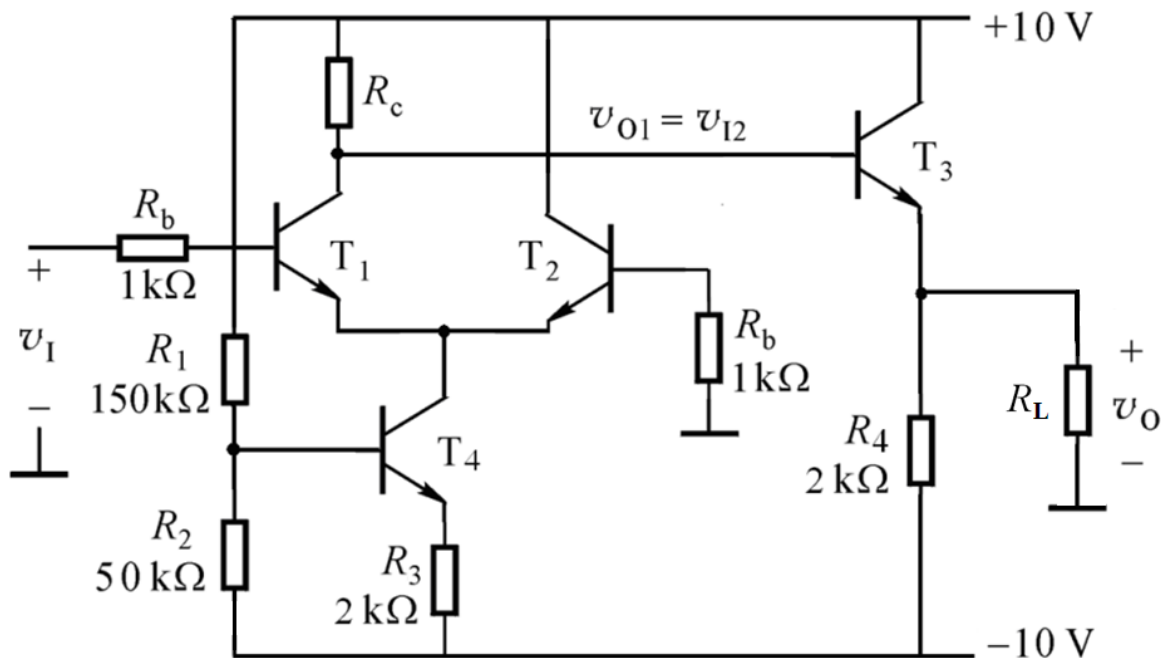
$$I_{E4} = \frac{\frac{50}{150 + 50} \times 20V - V_{BE}}{\frac{R_1 // R_2}{1 + \beta} + R_3} = \frac{5 - 0.7}{\frac{37.5}{51} + 2} = 1.57 \text{ mA}$$

$$I_{C1} = 0.79 \text{ mA}$$

$$I_{E3} = \frac{10V}{2} = 5 \text{ mA}$$

$$I_{B3} = \frac{5}{50} = 0.1 \text{ mA}$$

$$R_c = \frac{10 - 0.7}{0.79 + 0.1} = 10.4 \text{ k}\Omega$$



### (3) 电压增益：

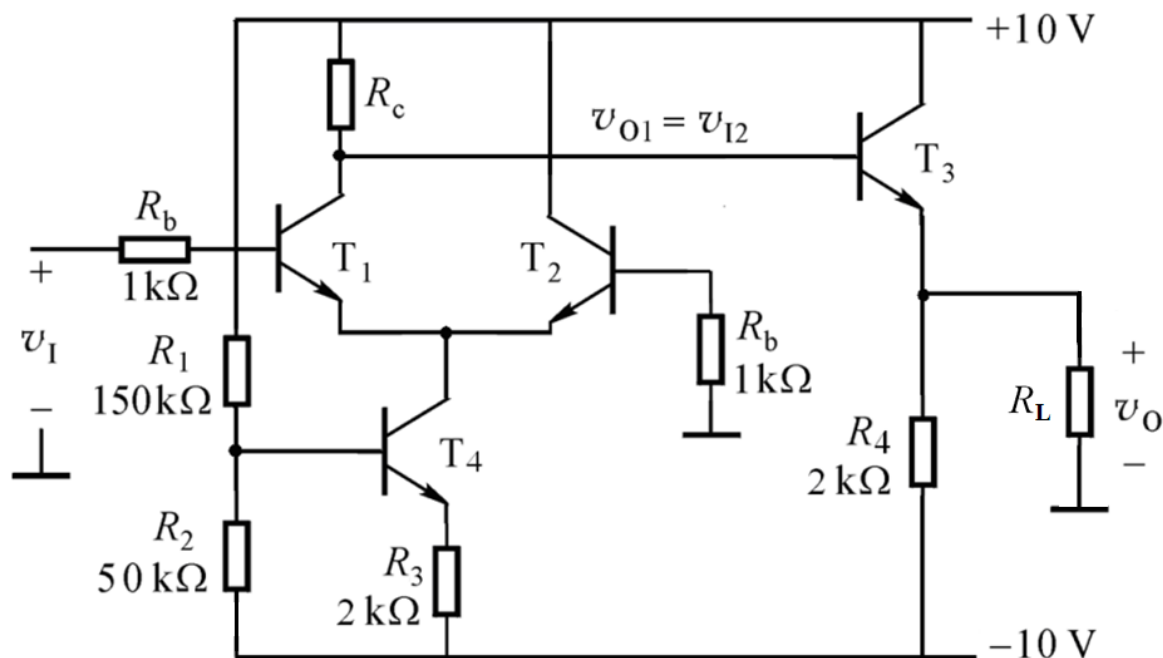
$$A_{v1} = -\frac{\beta(R_c // R_{i2})}{2(R_b + r_{be1})}$$

$$R_{i2} = r_{be3} + (1 + \beta)(R_4 // R_L)$$

$$A_{v2} = \frac{(1 + \beta)(R_4 // R_L)}{r_{be3} + (1 + \beta)(R_4 // R_L)}$$

### (4) 输入电阻：

$$R_i = 2(R_b + r_{be1})$$

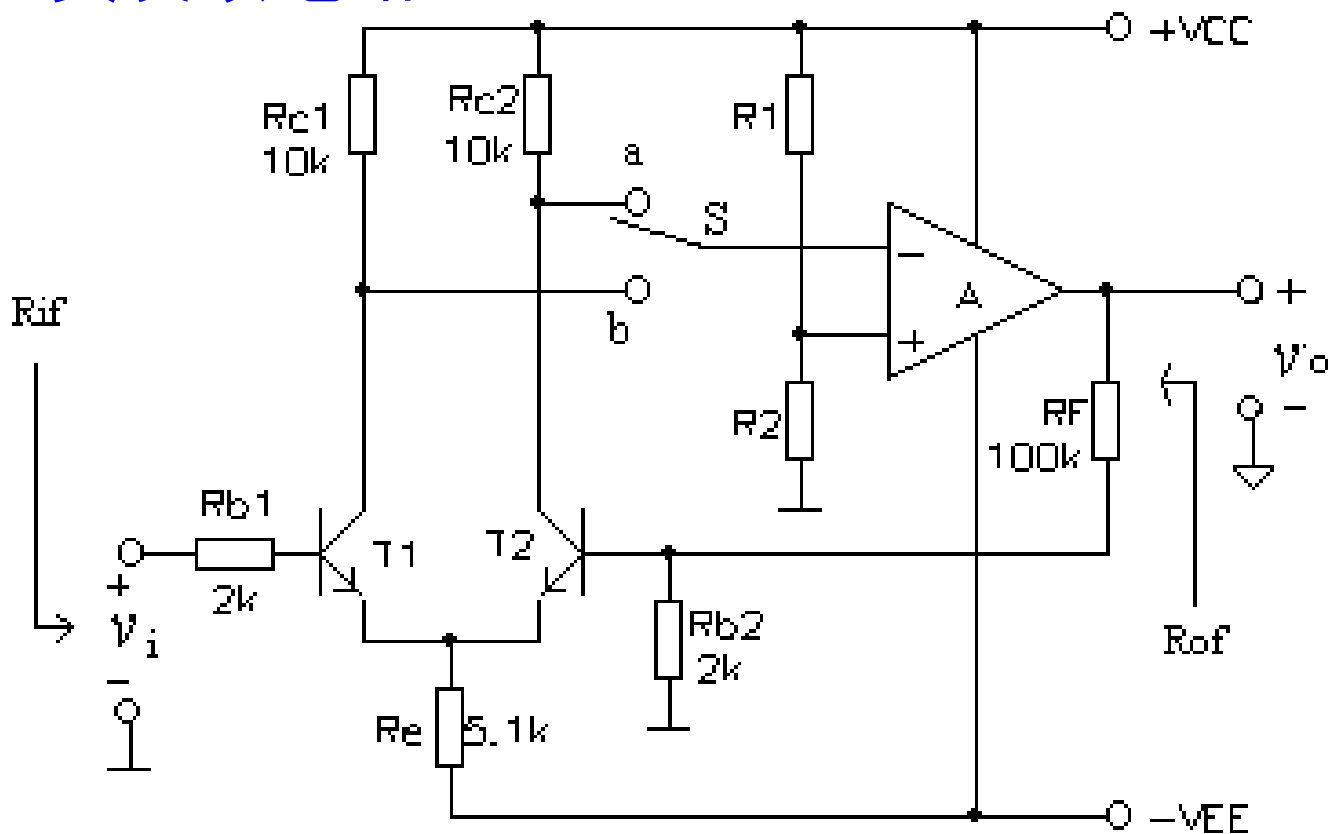




## ➤ 负反馈与运算电路

- ✧ 反馈极性和类型的判断
- ✧ 掌握负反馈对放大电路性能的影响
- ✧ 理解深度负反馈中“虚短”和“虚断”的本质含义，掌握深度负反馈的近似计算
- ✧ 会区别集成运放的“线性应用”与“非线性应用”
- ✧ 熟练掌握反相放大、同相放大、积分运算等运算电路
- ✧ 会用“虚短”和“虚断”分析较复杂的运算电路

# 【例3】负反馈电路



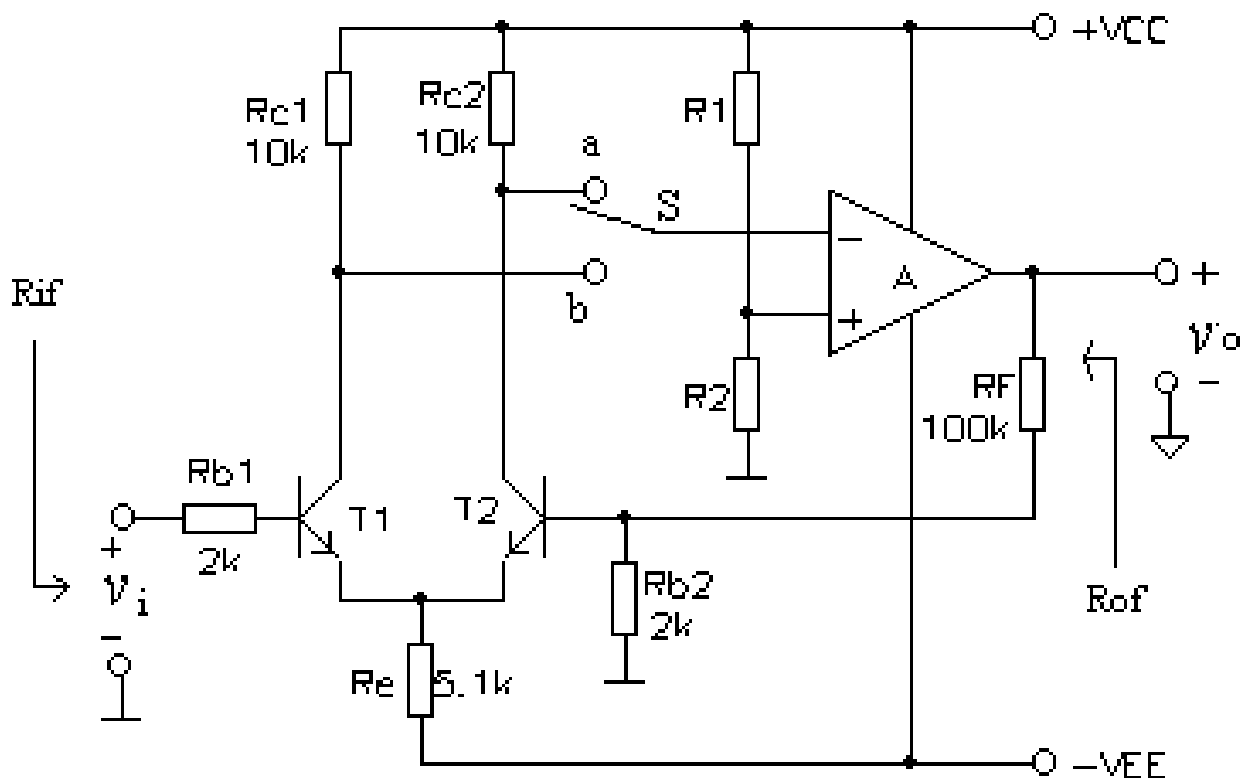
- (1) 开关S应置于a端还是b端，才能引入负反馈？
- (2) 与开环时相比， $R_{if}$ 、 $R_{of}$ 是增大了还是减少了？
- (3) 如满足深度负反馈条件， $A_{vf} = \Delta v_o / \Delta v_i \approx ?$
- (4) 在电路中为什么要接入 $R_1$ 、 $R_2$ ？其分压比应如何选择？



【解】 (1) S置于b端，才能引入负反馈。

(2)  $R_{if}$ 增大， $R_{of}$ 减少。

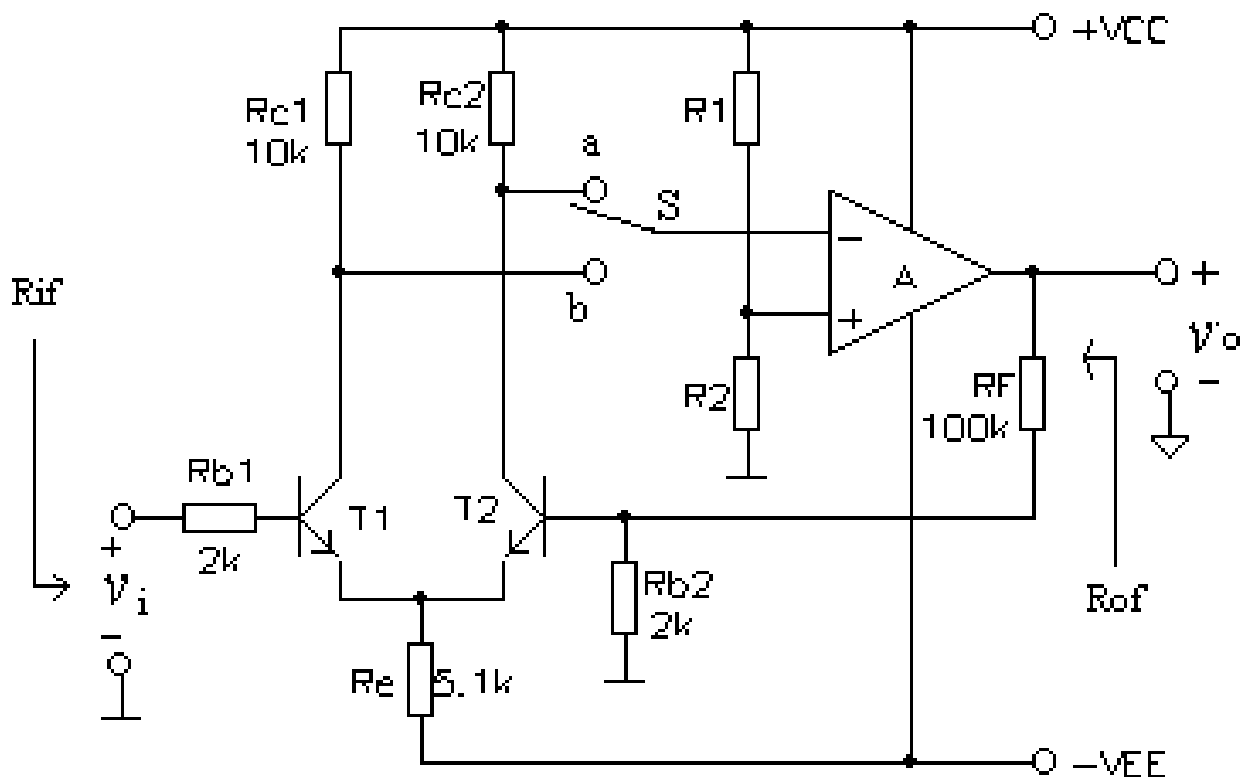
$$(3) A_{vf} = \frac{\Delta v_o}{\Delta v_i} = \frac{R_f + R_{b2}}{R_{b2}} = 51$$





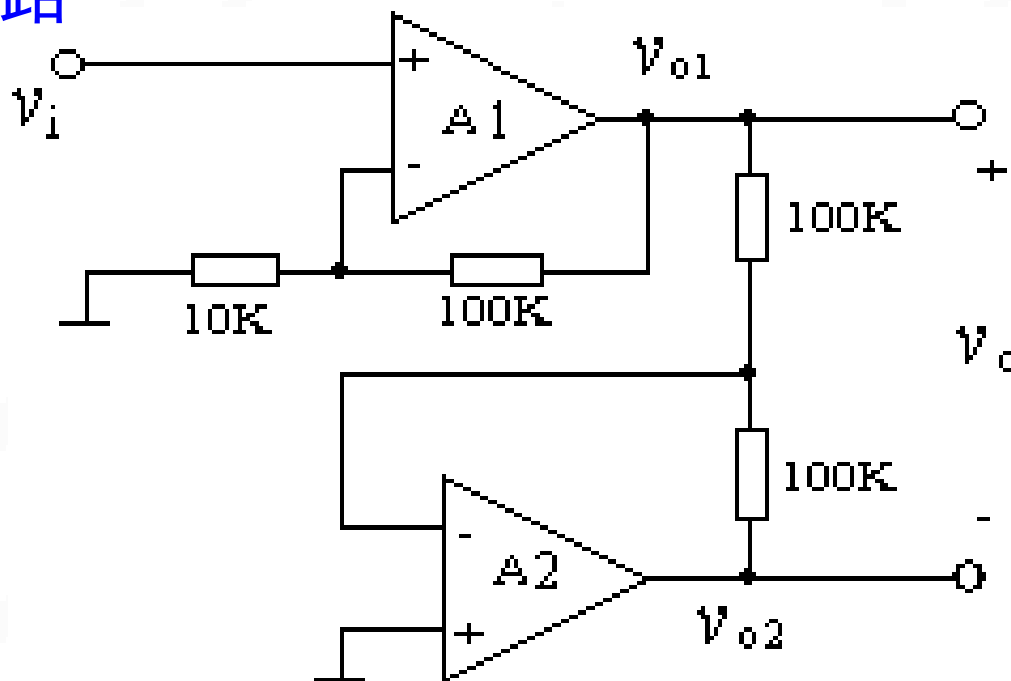
(4)在电路中接入 $R_1$ 、 $R_2$ 是因为运放工作在线性放大区，要求静态时输入电压近似为0，否则运放输出处于饱和状态。

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = V_{CC} - I_{C1Q} R_{c1}$$





## 【例4】运算电路



在图示电路中，设 $A_1$ 、 $A_2$ 为理想运放。

- (1) 分别说明 $A_1$ 、 $A_2$ 所组成的电路中引入了哪种组态的交流负反馈。
- (2) 求出 $v_{o1}$ 、 $v_{o2}$ 、 $v_o$ 对 $v_i$ 的运算关系式。



【解】

(1)

$A_1$ : 电压串联负反馈

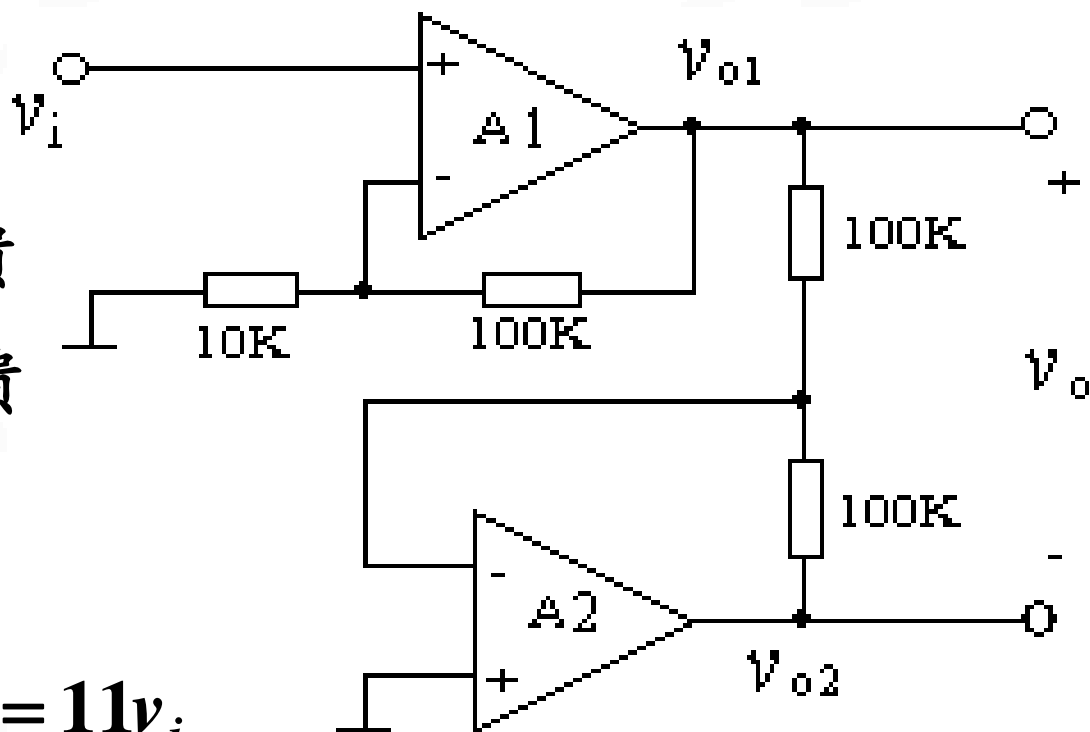
$A_2$ : 电压并联负反馈

(2)

$$v_{o1} = \left( 1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \right) v_i = 11v_i$$

$$v_{o2} = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} v_{o1} = -v_{o1} = -11v_i$$

$$v_o = v_{o1} - v_{o2} = 22v_i$$





## ➤ 波特图及稳定性

- ✧ 掌握耦合电容、结电容对放大电路频率响应特性的影响
- ✧ 掌握频率特性表达式的表示及波特图的画法
- ✧ 理解负反馈放大电路产生自激振荡的原因
- ✧ 掌握负反馈放大电路的稳定判据，会求取负反馈放大电路的稳定裕度



## 【例5】波特图及稳定性

某负反馈放大电路的开环放大倍数表示为：

$$\dot{A} = \frac{10^5}{(1 + j \frac{f}{10^4})(1 + j \frac{f}{10^5})(1 + j \frac{f}{10^6})}$$

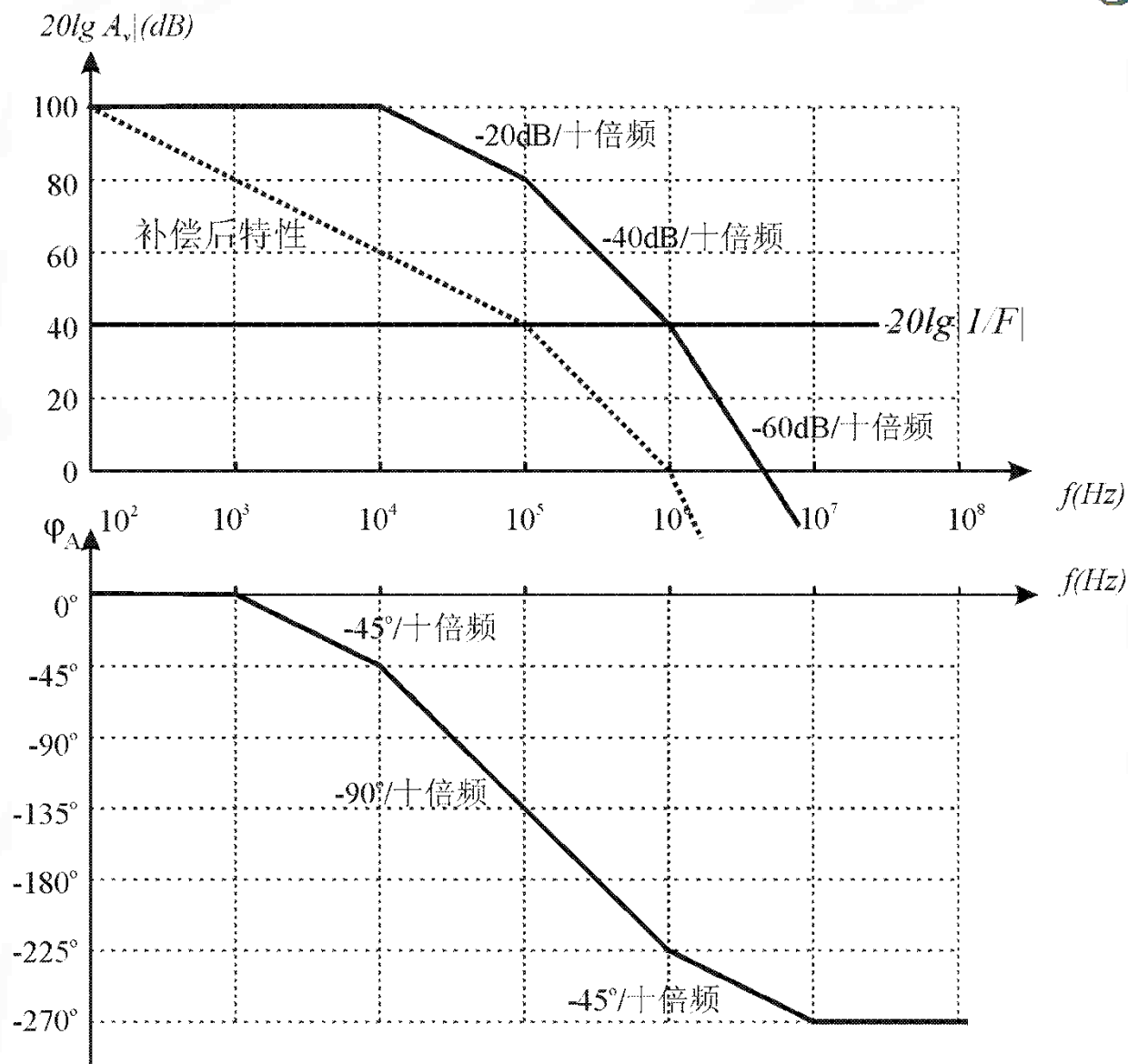
- (1) 画出波特图（对数幅频和相频特性曲线）；
- (2) 若闭环时取  $|\dot{F}| = 1/100$ ，判断电路是否会自激？
- (3) 若采用电容补偿后，使  $f_{p1}$  由  $10^4 \text{ Hz}$  下降为  $10^2 \text{ Hz}$ ，求此时的相位裕度  $\varphi_m = ?$

【解】

(1) Bode图：

(2) 若  $|\dot{F}| = 1/100$ ，  
则会产生自激。

(3) 采用电容补  
偿后，相位裕  
度  $\varphi_m = 45^\circ$ 。





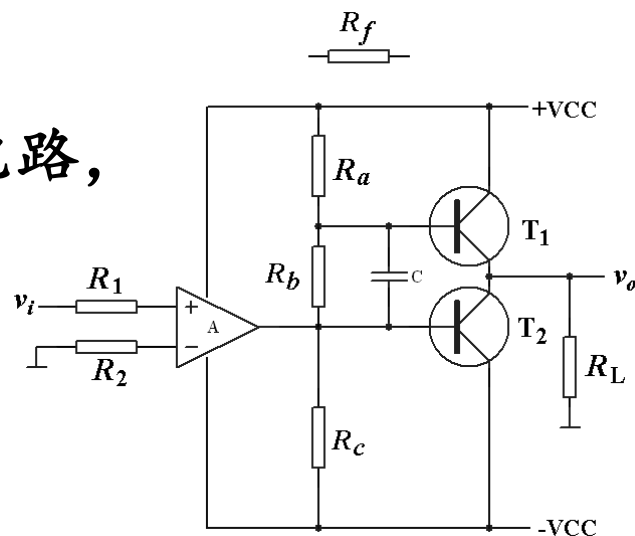
## ➤ 功率放大与稳压电源电路

- ✧ 掌握功放电路的电路型式与工作原理
- ✧ 掌握集成运放的电流扩展
- ✧ 掌握  $P_o$ 、 $P_E$ 、 $P_T$ 、 $\eta$  的计算，掌握功放管极限参数 ( $V_{BR(CEO)}$ 、 $I_{CM}$ 、 $P_{CM}$ ) 的选择
- ✧ 了解直流稳压电源的组成
- ✧ 了解桥式整流、电容滤波的工作原理
- ✧ 掌握线性串联稳压电路的工作原理，会计算输出电压、调整管管耗

## 【例6】功率放大电路

图示为一集成运放驱动功率放大电路，  
 $V_{CC}=15\text{ V}$ ， $R_L=20\Omega$ ， $R_1=R_2=1\text{ k}\Omega$ 。

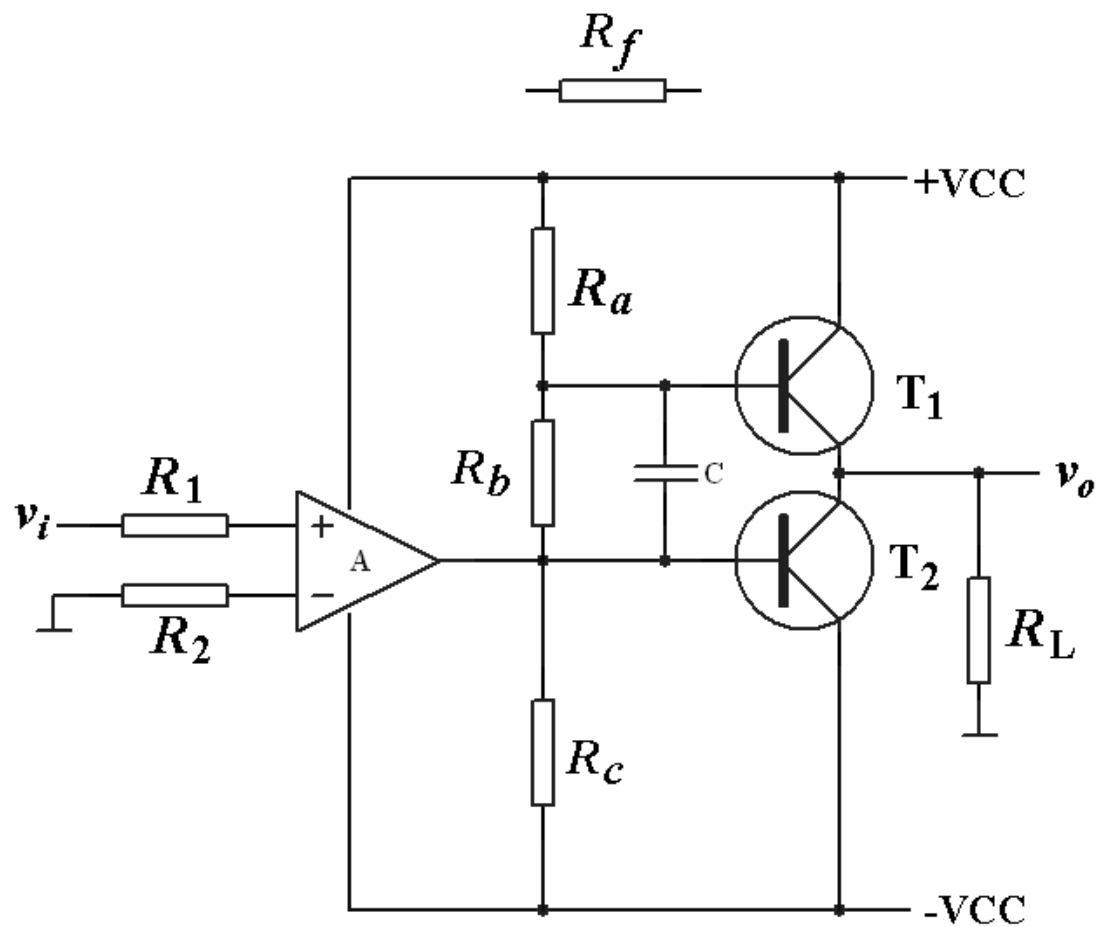
(1) 在图上标出三极管 $T_1$ 、 $T_2$ 的发射极箭头方向，并说明电阻 $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$ 、电容 $C$ 在电路中的作用。



(2) 当输出  $v_o = 8\sin\omega t\text{ V}$  时，求：负载上所得到的输出功率 $P_o$ ；功放级的效率 $\eta$ ； $T_1$ 、 $T_2$ 的管耗 $P_{T1}$ 、 $P_{T2}$ 。

(3) 在调试过程中，若不小心将电阻 $R_b$ 短路，估计会出现什么现象？若 $R_b$ 断开，又会出现什么现象？

(4) 为了提高带负载能力，并改善输出波形，应如何引入负反馈电阻 $R_f$ （请在图中画出）。若要求引入负反馈后 $A_{vf}=50$ ，求 $R_f$ 的阻值。





【解】

(1) 箭头方向：如图。

$R_b$  提供偏置电压，  
 $R_a$ 、 $R_c$  提供  $R_b$  电流， $C$   
使  $R_b$  交流短路。

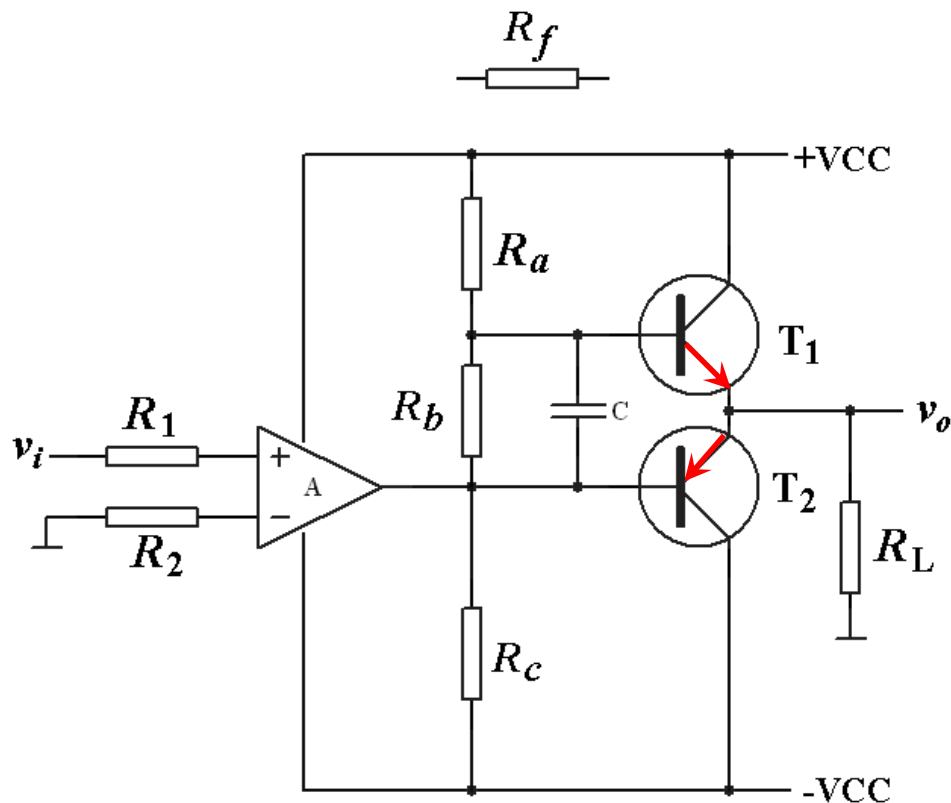
(2) 求功率、效率、管耗

$$P_o = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = \frac{64}{2 \times 20} = 1.6W$$

$$P_E = \frac{2V_{CC}V_{om}}{\pi R_L} = \frac{2 \times 15 \times 8}{\pi \times 20} = 3.8W$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_E} = 42\%$$

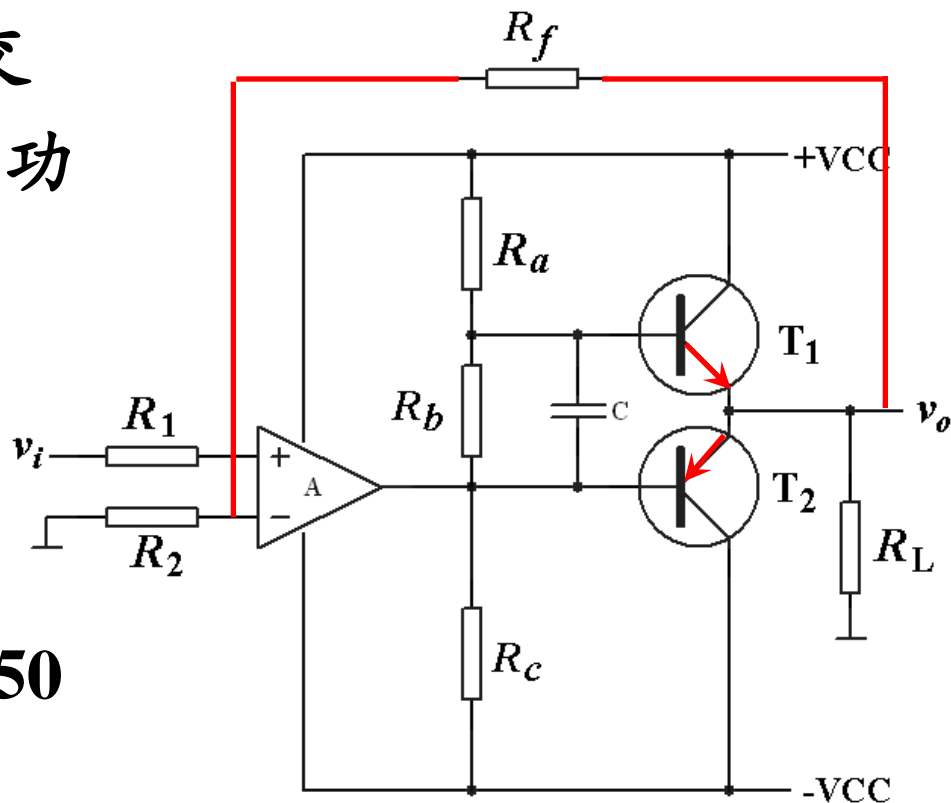
$$P_{T1} = P_{T2} = \frac{P_E - P_o}{2} = 1.1W$$





(3) 若 $R_b$ 短路，则出现交越失真；若 $R_b$ 开路，则功率管可能被烧坏。

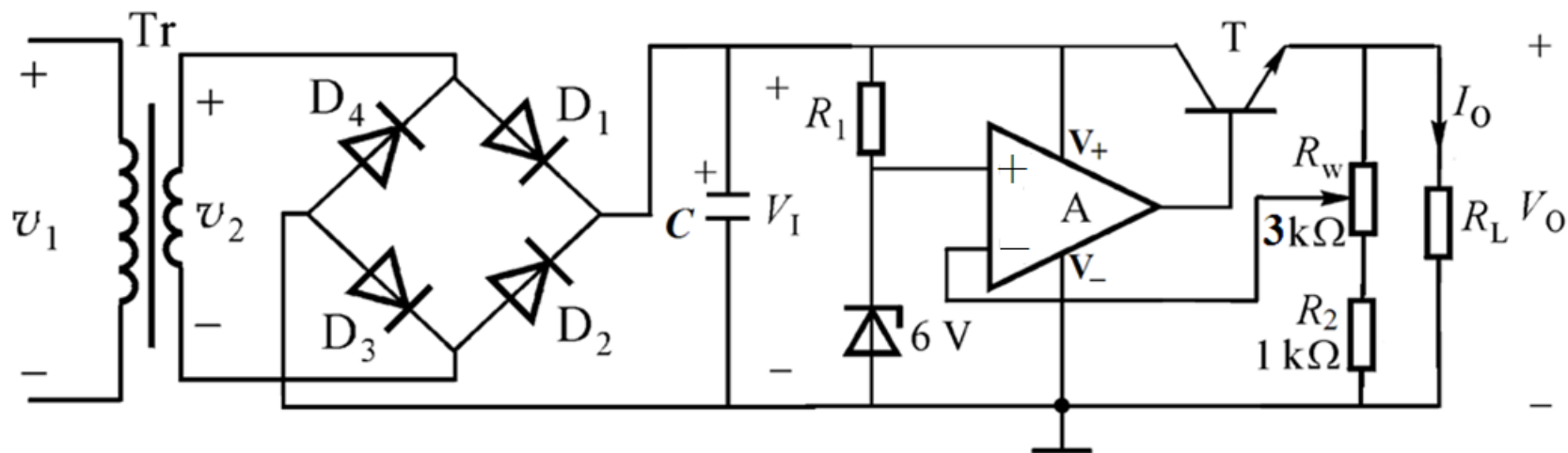
(4) 引入负反馈：如图。



$$A_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_2} = 1 + \frac{R_f}{1 \text{ k}\Omega} = 50$$

$$R_f = 49 \text{ k}\Omega$$

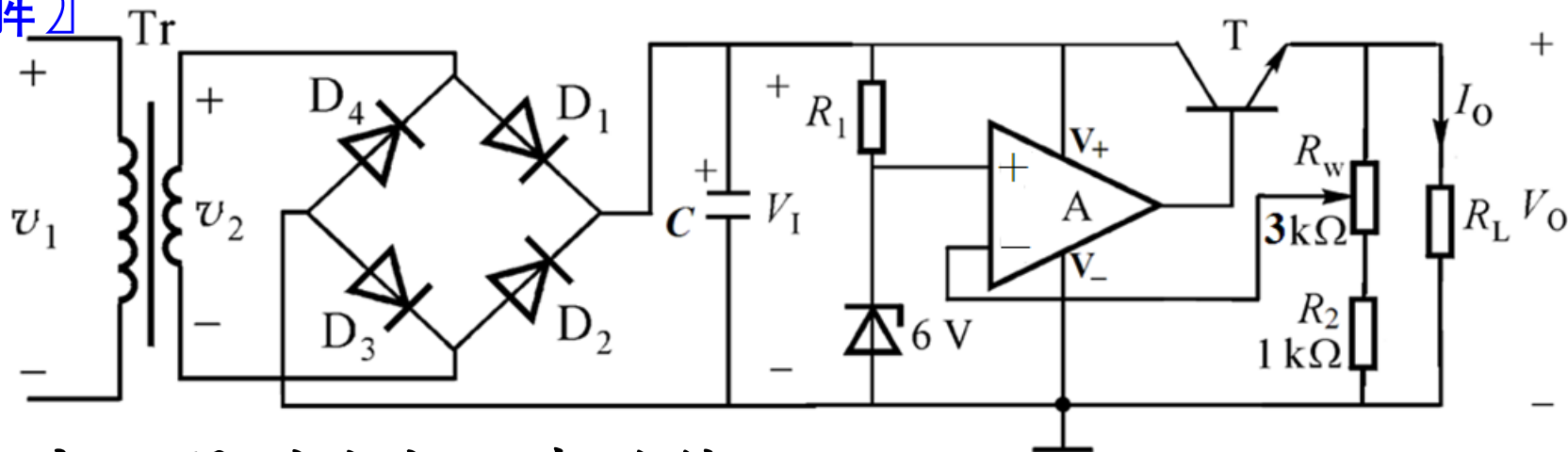
## 【例7】稳压电源电路



已知运放的最大输出电压为20V，最大输出电流为10mA，调整管的 $V_{BE}=0.7\text{V}$ ，稳压管的 $V_Z=6\text{V}$ ， $R_2=1\text{k}\Omega$ ， $R_w=3\text{k}\Omega$ ， $C$ 为 $1000\mu\text{F}$ 的电解电容，已知 $V_I=24\text{V}$ 。

- (1) 估算变压器副边电压有效值 $V_2$ ；
- (2) 计算输出电压 $V_O$ 的调节范围；
- (3) 若要求输出电流 $I_O$ 最大可达0.5A，则调整管的电流放大倍数 $\beta$ 值应大于多少？调整管的集电极允许功耗 $P_{CM}$ 应大于多少？

【解】



(1) 变压器副边电压有效值:

$$V_I = 1.2V_2 = 24 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ V}$$

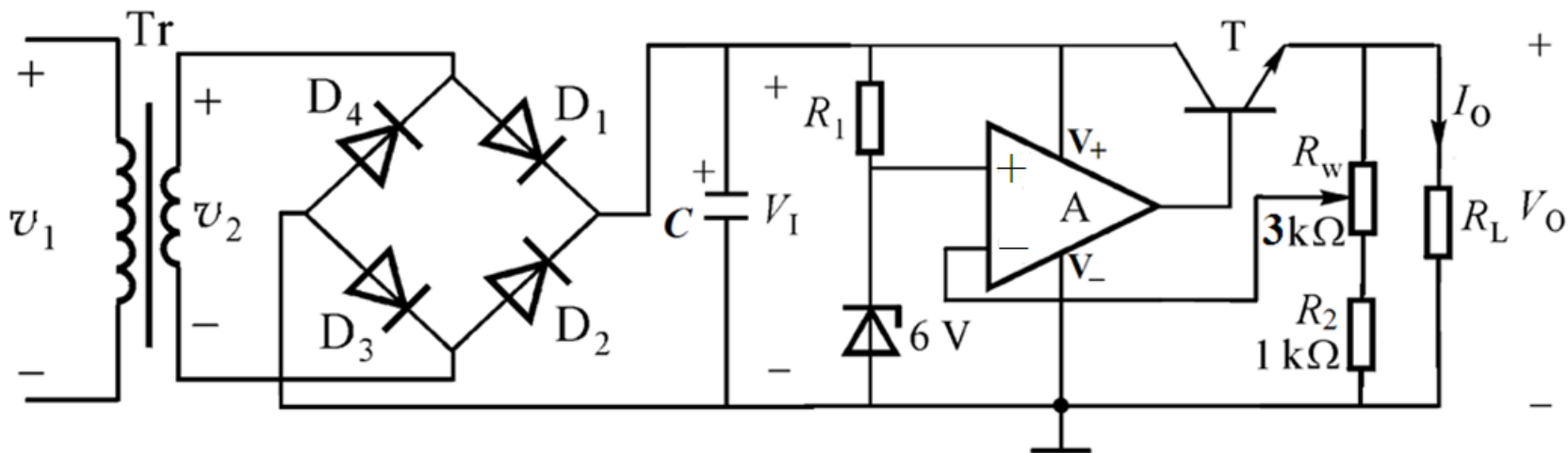
(2) 输出电压 $V_O$ 的调节范围:

电位器 $R_w$ 滑动端在最上方时,  $V_{O\min} = 6 \text{ V}$

电位器 $R_w$ 滑动端在最下方时,

$$V_O = \left(1 + \frac{R_w}{R_2}\right)V_Z = 24 \text{ V} > (20 - 0.7) \text{ V}$$

$$V_{O\max} = 19.3 \text{ V}$$



(3) 若要求 $I_O$ 最大可达0.5A：

$$\beta > \frac{I_E}{I_B} \approx \frac{0.5 \text{ A}}{10 \text{ mA}} = 50$$

$$P_{CM} > V_{CE \max} I_{E \max} = (24 - 6) \times 0.5 = 9 \text{ W}$$

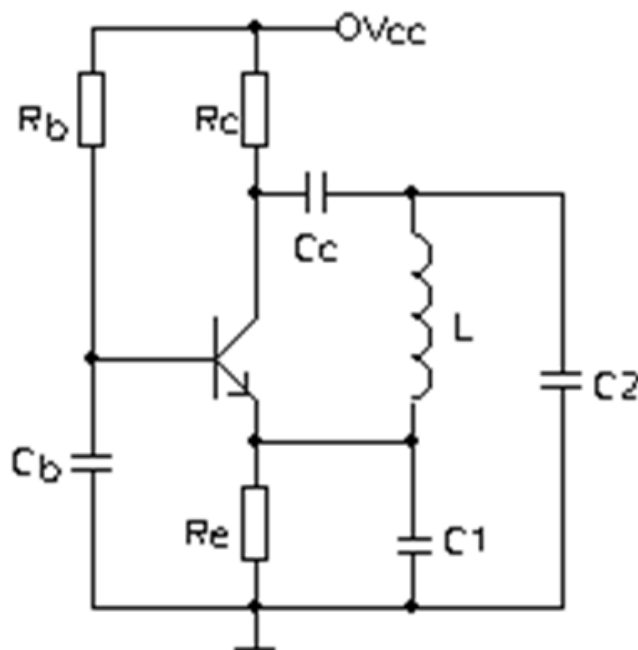
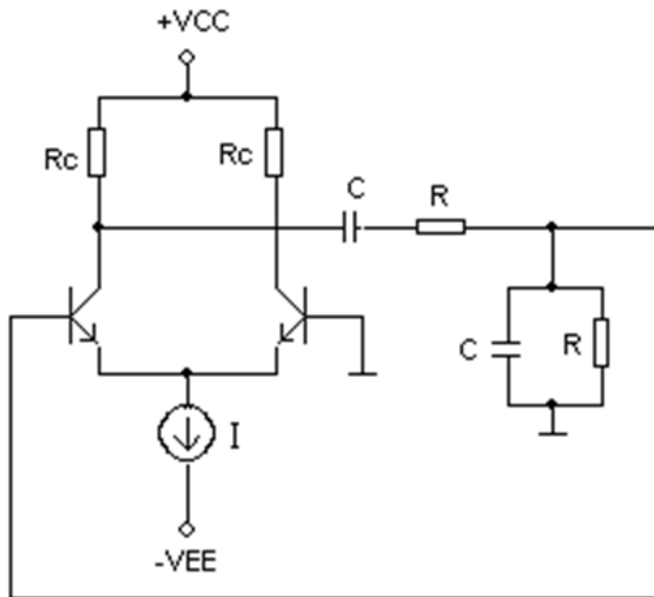


## ➤ 波形发生电路

- ✧ 正弦振荡器的特点；幅值条件、相位条件
- ✧ RC桥式正弦波振荡器的电路结构，频率计算，稳幅方法
- ✧ LC正弦振荡电路的电路型式，频率计算，能用瞬时极性法判断LC振荡器是否满足相位条件
- ✧ 比较器的电路型式（单限比较器、滞回比较器、窗口比较器、三态比较器）及电压传输特性分析
- ✧ 两种方波发生电路(**RC电路+反相滞回比较器；积分器+同相滞回比较器**)的电路结构，会分析工作原理，会画波形，会推导周期



## 【例8】正弦振荡电路



各电路中，设各耦合电容和旁路电容在工作频率下其容抗可忽略不计。

(1)判断电路能否产生正弦振荡？若电路不能振荡，试在图上改正。

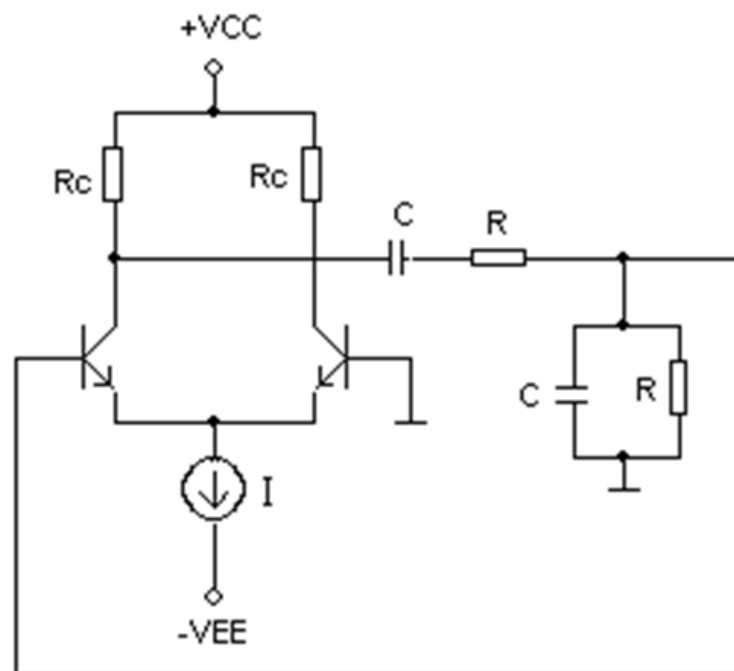
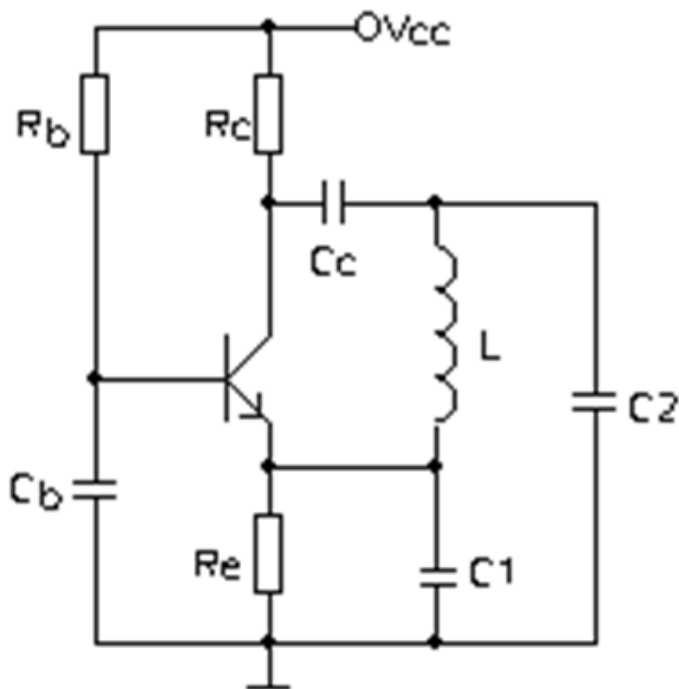
(2)在满足自激振荡的条件下，写出电路的振荡频率表达式。

【解】

图(a): 不能产生正弦振荡。

改正: 从 $T_2$ 管c极引出。

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

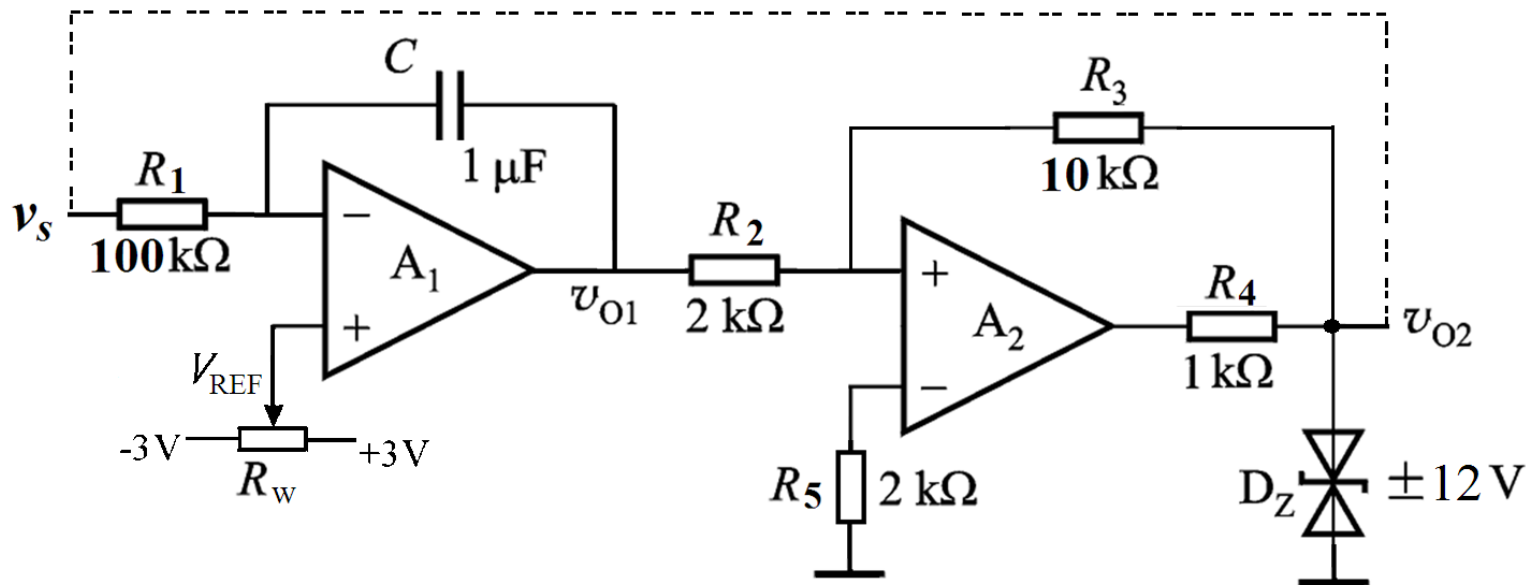


图(b): 不能产生正弦振荡。

改正: 反馈引入基极, 发射极通过旁路电容接地。

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

## 【例9】非正弦波发生电路

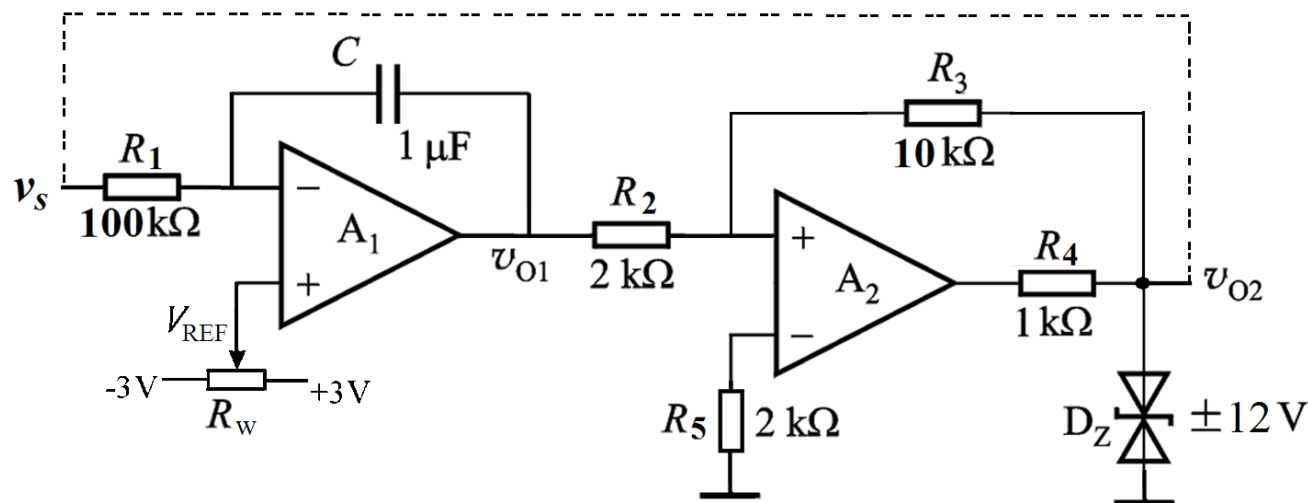


已知 $A_1$ 、 $A_2$ 为理想运放，运放电源接 $\pm 15\text{ V}$ ，电位器 $R_W$ 处于中间位置。设 $t=0$ 时， $v_C(0)=0$ ， $v_{O2}(0)=+12\text{ V}$ 。

- (1)  $A_1$ 、 $A_2$ 分别组成什么电路？
- (2) 若虚线断开， $v_S$ 加入 $12\text{ V}$ 阶跃信号后，请画出 $v_{O1}$ 和 $v_{O2}$ 波形，并求出输出经过多长时间后 $v_{O2}$ 翻转为 $-12\text{ V}$ 。
- (3) 按虚线将 $v_{O2}$ 与 $v_S$ 相连后，画出 $v_{O1}$ 和 $v_{O2}$ 波形，并计算周期。
- (4) 若调节电位器 $R_W$ 使 $V_{\text{REF}} > 0$ ，则 $v_{O2}$ 的波形将如何变化？



【解】

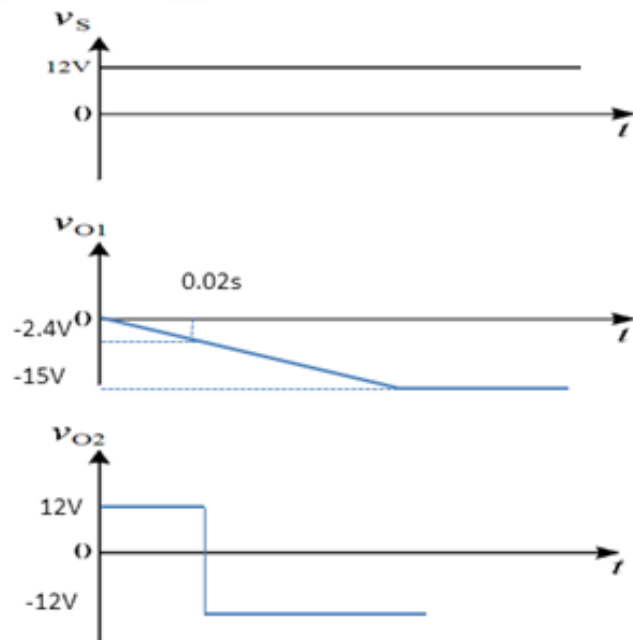


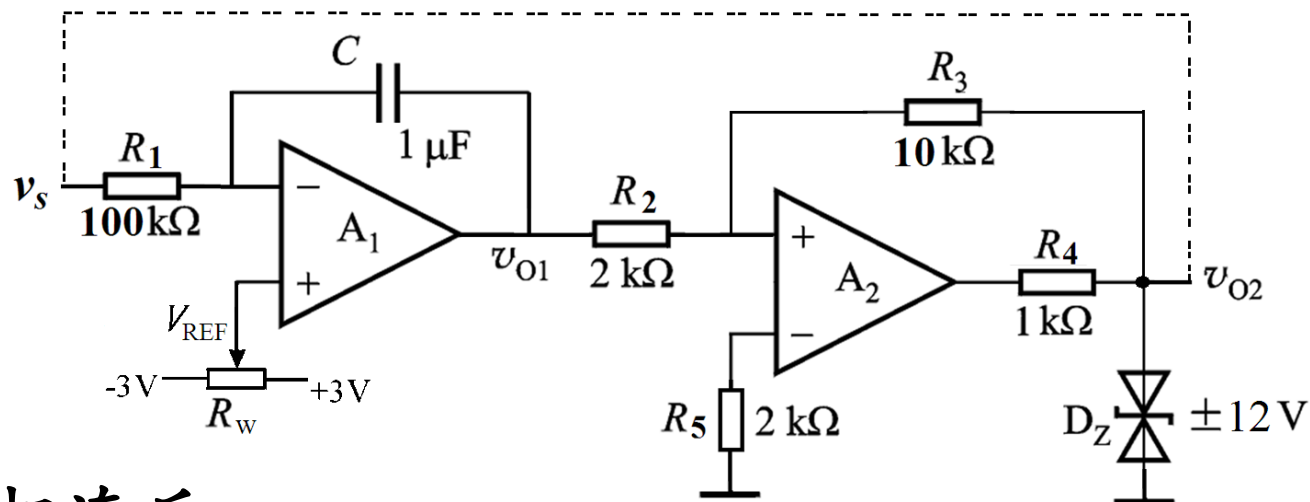
(1)  $A_1$  组成积分电路， $A_2$  组成同相滞回比较器。

(2)  $v_s$  加入 12 V 阶跃信号

$$v_{O1} = -\frac{1}{C} \int \frac{v_s}{R_1} dt = -\frac{12V}{R_3} R_2 = -2.4$$

$$t = 0.02s$$



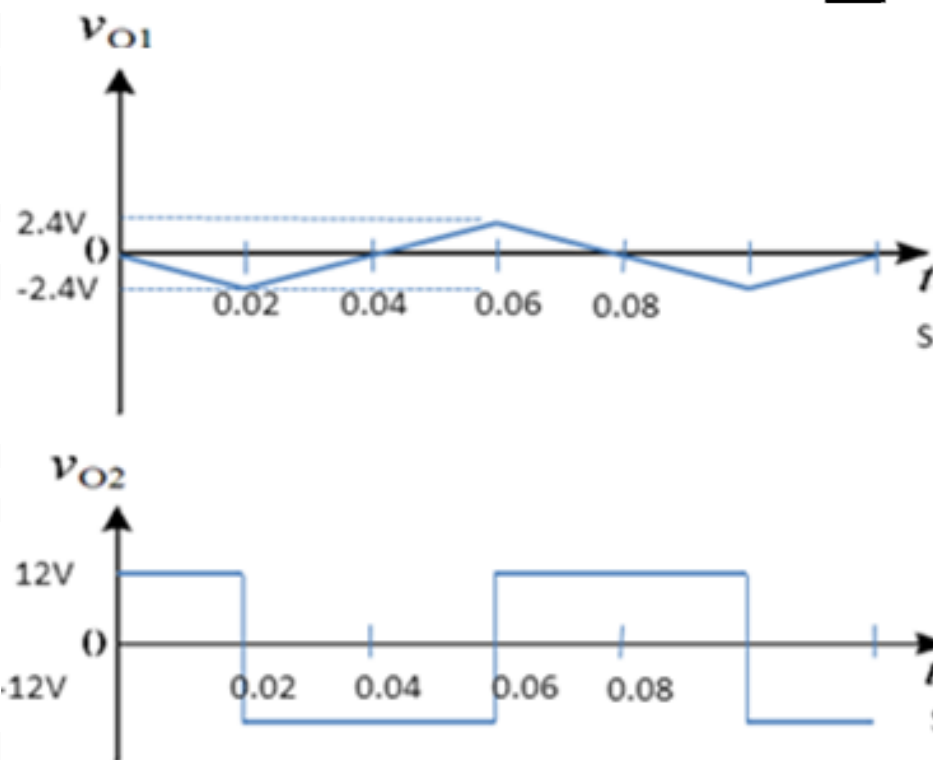


(3) 将  $v_{O2}$  与  $v_s$  相连后：

$$T = 0.08s$$

(4)  $V_{REF} > 0$  时：

$v_{O2}$  波形将变为矩形波，高电平宽度增大，低电平宽度减小。





## 考试说明

✧ 范围：全部内容（以下的除外），打\*的除外。

以下内容不属于考试范围：

- 集成运放内部电路
- CMOS放大电路(1.3)；跨导运算放大器(2.3.7)
- 集成功率放大器芯片(3.1.5.2)；  
三端集成稳压器芯片(3.2.2.2)
- 集成电压比较器芯片(4.5.2)；石英晶振(4.4)；  
压控振荡器(4.6)

✧ 重点：多级放大电路、负反馈、波特图及稳定性、  
功率电路、波形发生电路

✧ 题型：填空若干，大题（6~7题）

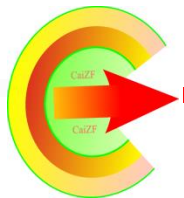


## 考试提示

- ✧ 日期：1月24日 星期日 **10:30~12:30**
- ✧ 地点：西1-102室
- ✧ 允许物品：直尺、计算器
- ✧ 答疑：23日下午 13:30-16:00 东三304室



Thank you for your attention



蔡忠法

浙江大学电工电子教学中心

Ver3.51

版权所有©

2021年